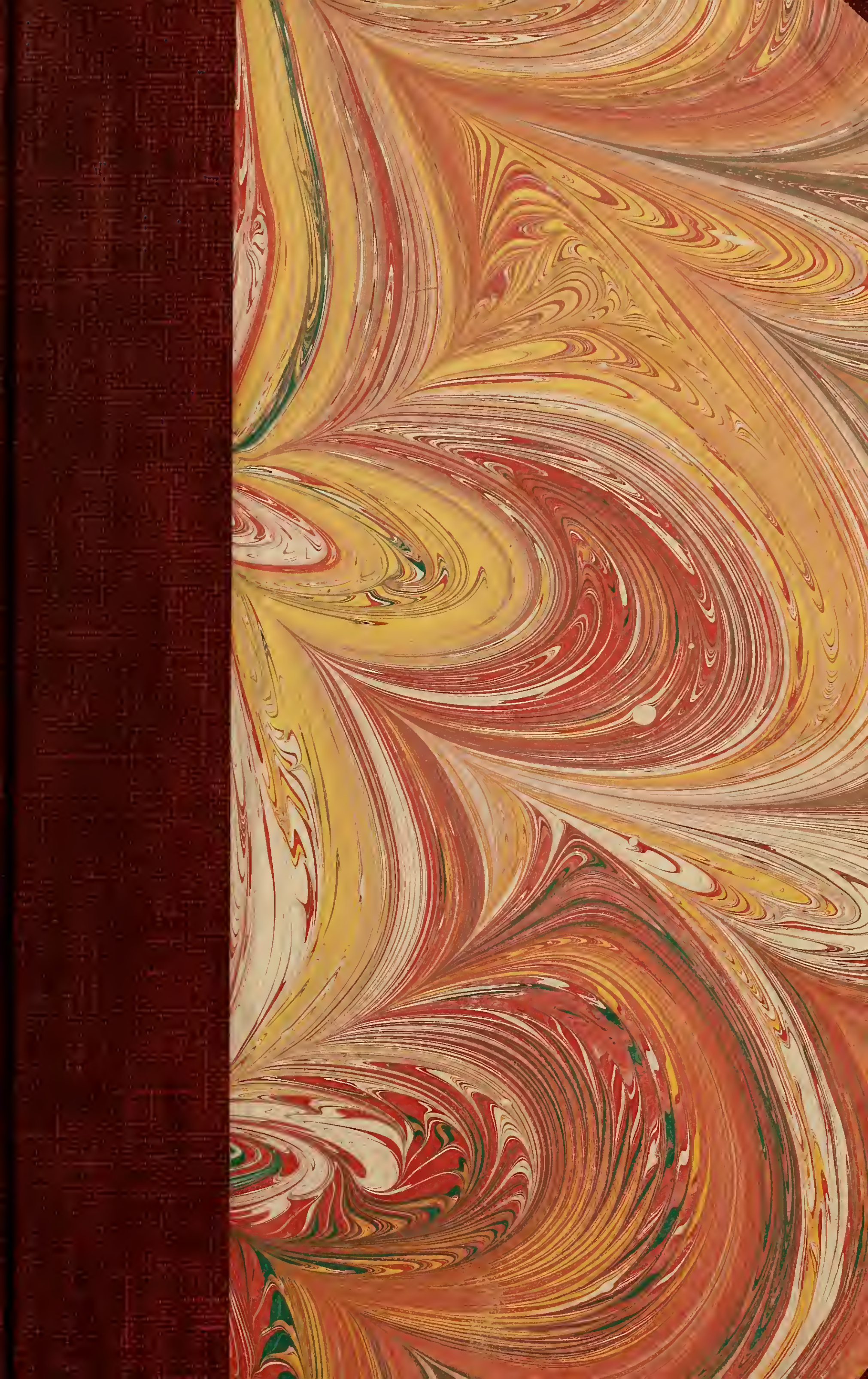
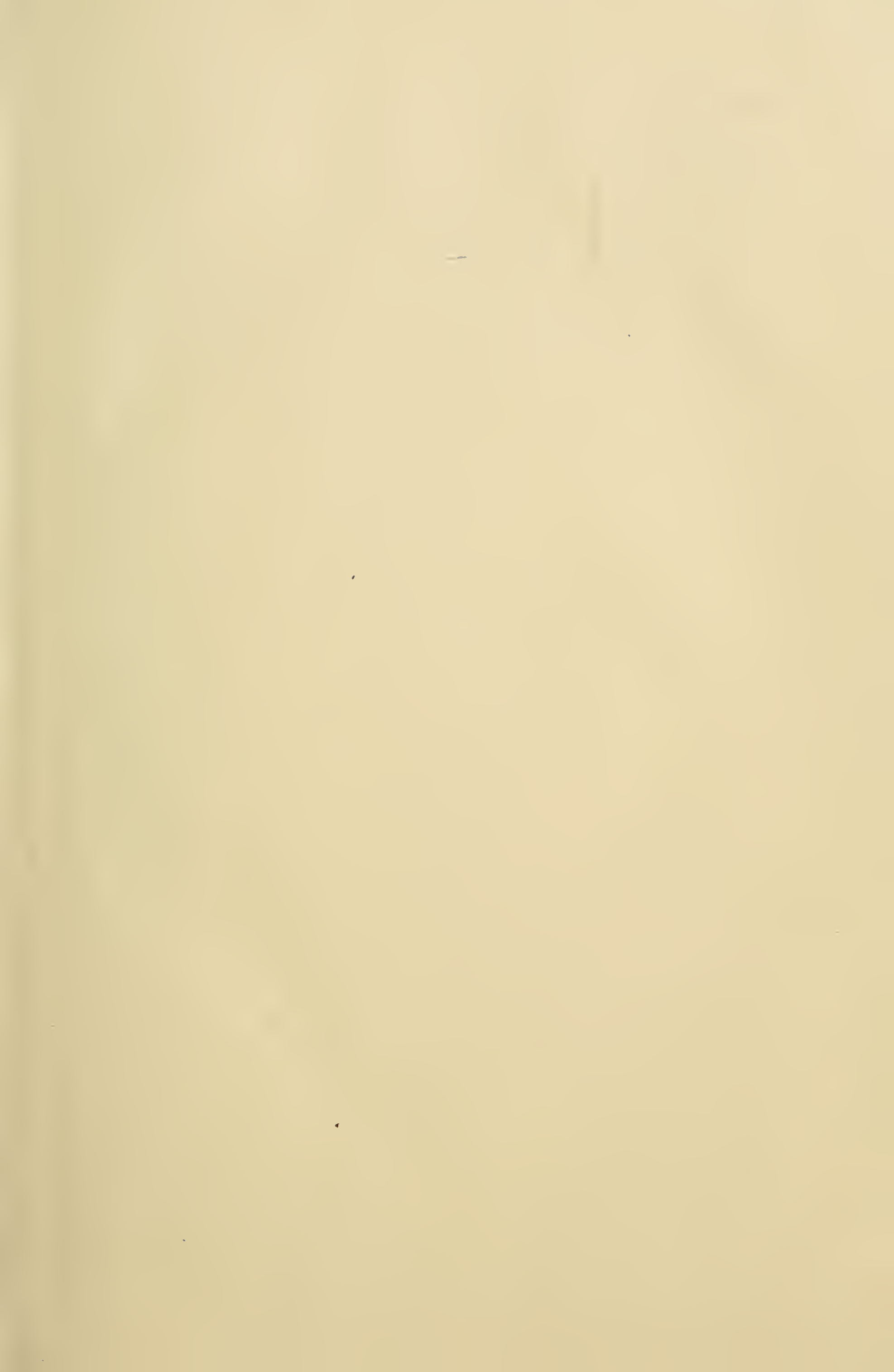








Die

Entwickelung der Materie

enthüllt durch die

Radioaktivität

Wilde-Vorlesung
gehalten am 23. Februar 1904 in der Literary and Philosophical Society in Manchester

von

Frederick Soddy, M. A.

Autorisierte Übersetzung von **Prof. G. Siebert**



LEIPZIG
Verlag von Johann Ambrosius Barth
1904

Die

Entwickelung der Materie

enthüllt durch die

Radioaktivität.

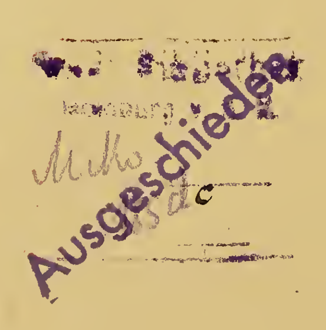
Wilde-Vorlesung
gehalten am 23. Februar 1904 in der Literary and Philosophical Society in Manchester
von

Frederick Soddy, M. A.

Autorisierte Übersetzung von **Prof. G. Siebert.**



LEIPZIG
Verlag von Johann Ambrosius Barth
1904



Spamersche Buchdruckerei in Leipzig.

Gewisse Elemente besitzen die Eigenschaft, ununterbrochen und ohne irgend einen äußeren Anreiz eine eigentümliche Art von Strahlung auszusenden. Diese Eigenschaft wird als Radioaktivität bezeichnet. Eine Strahlung ist ein Einfluß, der sich von seiner Quelle aus nach allen Richtungen hin geradlinig durch den Raum fortpflanzt. Das erste bekannte Beispiel einer Strahlung war natürlich die Lichtstrahlung. Nach Newtons Auffassung besteht die Lichtstrahlung darin, daß von den strahlenden Gegenständen äußerst kleine Teilchen oder Korpuskeln ausgesandt werden, die sich in geradlinigen Bahnen nach allen Richtungen hin durch den Raum fortpflanzen. Heute wissen wir, daß das Licht durch eine Wellenbewegung des Lichtmediums erklärt werden muß. Andererseits wurden die von den radioaktiven Elementen ausgehenden Strahlungen anfangs für Wellen gehalten, während man sie jetzt als eine Verwirklichung von Newtons Lichttheorie erkannt hat. Diese Strahlungen werden durch den radialen Flug kleiner Teilchen (Korpuskeln) verursacht, und jedes dieser Teilchen führt eine elektrische Ladung mit sich. Mit dem Wort „Strahlung“

bezeichnet man also jetzt zwei ganz verschiedene Erscheinungen. Das letzte Jahrzehnt wird voraussichtlich wegen der Entdeckung neuer Strahlungen, und zwar von Strahlungen jeder der beiden Arten, in der Erinnerung fortleben. Die Erscheinung, welche von Sir William Crookes als „strahlende Materie“ bezeichnet wurde, die aber jetzt unter dem Namen „Kathodenstrahlen“ allgemeiner bekannt ist und die durch elektrische Entladung im luftleeren Raum erzeugt wird, wird durch den Flug rasch bewegter Korpuskeln hervorgebracht, die eine elektrische Ladung mit sich führen. Den Beweis hierfür bildet der Umstand, daß diese Strahlen vom Magneten abgelenkt werden. Eine Reihe von Untersuchungen, die von Professor J. J. Thomson und seinen Kollegen ausgeführt wurden, auf die wir jedoch nicht näher eingehen können, haben zu folgenden Ergebnissen geführt: 1. Die vom Kathodenstrahlenteilchen mitgeführte Ladung ist die Atomladung oder diejenige Ladung, die bei der Elektrolyse von einem einwertigen Ion mitgeführt wird; 2. die Masse des Teilchens ist ungefähr nur ein Tausendstel der Masse des leichtesten von allen Atomen, die den Chemikern bekannt sind; 3. die Geschwindigkeit des Kathodenstrahlenteilchens ist gewöhnlich ungefähr ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit, schwankt aber innerhalb ziemlich weiter Grenzen. Lenard fand, daß, wenn in einer Crookesschen Röhre im

Wege der Kathodenstrahlen ein Fenster aus dünner Aluminiumfolie angebracht wird, die Strahlen durch das Fenster austreten und außerhalb der Röhre untersucht werden können. Diejenigen Teilchen, welche sich mit geringer Geschwindigkeit bewegen, werden von der Metallfolie zurückgehalten, diejenigen, welche durch die Metallfolie hindurchdringen, besitzen Geschwindigkeiten, die ungefähr gleich einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit sind.

Die nächste Entdeckung war die der X-Strahlen durch Röntgen. Diese Strahlen bilden, angenommenen Theorien zufolge, neue Beispiele von Ätherwellen. Sie entstehen, wenn die Kathodenstrahlenteilchen eine Geschwindigkeitsänderung erleiden, wenn sie z. B. auf ein Hindernis stoßen. Von dem Teilchen geht eine plötzliche elektromagnetische Schwingung nach allen Richtungen hin aus und veranlaßt die Entstehung der X-Strahlen. Diese unterscheiden sich von den gewöhnlichen Lichtstrahlen hauptsächlich durch den unregelmäßigen und plötzlichen Charakter der einzelnen Schwingungen.

Die Strahlen, mit denen wir es hauptsächlich zu tun haben, wurden 1896 von Becquerel entdeckt, und zwar gelegentlich einer Untersuchung der Fluoreszenz gewisser Uranverbindungen. Wir wissen jetzt, daß die neue Strahlung mit der Fluoreszenz nicht zusammenhängt, sondern daß sie eine

spezifische und unveränderliche Eigenschaft des Urans und einiger anderer Elemente ist. Ein unbedeutender Teil der Strahlung, die sogenannten γ-Strahlen, haben Ähnlichkeit mit der von Röntgen entdeckten Art von Strahlen und sind wahrscheinlich X-Strahlen von sehr großem Durchdringungsvermögen, die im Augenblicke der Ausstrahlung der β-Strahlen auftreten. Die letzteren bestehen, wie Becquerel gezeigt hat, aus Kathodenstrahlen von sehr großer Geschwindigkeit, und Kaufmann hat in den Radiumstrahlungen Kathodenstrahlen entdeckt, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit ist. Allein sowohl die β-Strahlen als auch die γ-Strahlen sind nur von untergeordneter Bedeutung. Etwas ganz neues auf dem Gebiete der Radioaktivität sind dagegen die sogenannten α-Strahlen. Rutherford*) hat im vorigen Jahre gezeigt, daß diese ebenso wie die β-Strahlen durch ein Magnetfeld abgelenkt werden, aber in der entgegengesetzten Richtung wie diese, woraus hervorgeht, daß das α-Teilchen positiv geladen ist. Die Ablenkung ist äußert gering und nur durch ein sehr starkes Magnetfeld zu bewirken. In einem Feld von gegebener Stärke ist der Krümmungsradius eines α-Strahls ungefähr tausendmal so groß als der Krümmungsradius eines Kathoden-

---

*) Phil. Mag. 1903, VI, 5, p. 177.

strahls. Unter der Voraussetzung, daß die Ladung eines α-Teilchens die Atomladung oder die Ionenladung ist, hat Rutherford durch Messung der Ablenkung nachgewiesen, daß die Masse des Teilchens von derselben Größenordnung ist wie die Masse des Wasserstoffatoms, und daß seine Geschwindigkeit ungefähr gleich einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit ist. Die radioaktiven Substanzen senden also Teilchen von atomistischen Dimensionen mit einer Geschwindigkeit von 30000 Kilometer per Sekunde aus.

Das Vorhergehende ist ein kurzer Überblick über das, was wir über die neuen Strahlenarten wissen. Wir haben gesehen, daß die X-Strahlen und wahrscheinlich auch die γ-Strahlen Störungen im Äther sind, daß dagegen die Kathodenstrahlen, ebenso die α-Strahlen und die β-Strahlen, durch die Bewegung materieller Teilchen erzeugt werden. Die beiden Gruppen von Erscheinungen haben jedoch große Ähnlichkeit untereinander, und die Verschiedenheit tritt nur in der Wirkung des Magnetfeldes zutage. Die verschiedenen Arten der Strahlung stimmen zunächst darin überein, daß sie die Materie proportional der Dichtigkeit, aber unabhängig von der Natur derselben, durchdringen. Vergleicht man Schichten verschiedener Stoffe von gleicher Oberfläche und von gleichem Gewicht, so findet man, daß sie alle den Durchgang der Strahlen annähernd

in demselben Grade hemmen. Ein ähnlicher Unterschied wie bei den Lichtstrahlen, die manche Substanzen, die sogenannten durchsichtigen, in dicken Schichten durchdringen, ohne einen erheblichen Verlust zu erleiden, während sie von anderen Substanzen, selbst von ganz dünnen Schichten derselben, zurückgehalten werden — ein solcher Unterschied existiert bei diesen neuen Strahlungsarten nicht. Das Durchdringungsvermögen dieser letzteren ist bei den verschiedenen Arten sehr verschieden. Die γ-Strahlen gehen leicht durch eine zolldicke Stahlplatte, während die α-Strahlen durch ein Blatt Briefpapier vollständig zurückgehalten werden. Allein das Gesetz, daß die Absorption der Strahlung der Dichtigkeit der absorbierenden Materie proportional ist, gilt annähernd auch für die neuen Strahlungsarten.

Die Methoden, deren man sich bedient, um diese Strahlungen zu entdecken und zu untersuchen, sind für alle Arten dieselben. Alle diese Strahlungen sind für das unbewaffnete Auge unsichtbar, aber sie besitzen die Eigenschaft, gewisse fluoreszierende Substanzen, die von ihnen getroffen werden, zum Aufleuchten zu bringen. Diese Wirkung ist für verschiedene Substanzen und für die verschiedenen Strahlungsarten allerdings sehr verschieden. Sämtliche neuen Strahlungsarten wirken auf die photographische Platte wie das Licht, aber ebenfalls in sehr verschiedenem Grade. Ihre

wichtigste Eigenschaft ist die Fähigkeit, die Luft oder andere Gase, durch die sie hindurchgehen, zu ionisieren. Die Gase werden durch die Wirkung der Strahlungen befähigt, die Elektrizität in solchen Mengen zu leiten, die der Intensität der Strahlung proportional sind.

Die zuletzt erwähnten drei Eigenschaften liefern die experimentellen Mittel für die Auffindung der neuen unsichtbaren Strahlungen. Das letzte gibt die Intensität der Strahlen durch eine leicht zu messende elektrische Größe an und ist von Rutherford zu einem äußerst genauen und bequemen Mittel für das qualitative und quantitative Studium der Radioaktivität ausgebildet worden.

Die große Ähnlichkeit zwischen den korpuskularen Strahlungsformen und den undulatorischen, z. B. den X-Strahlen legt in bemerkenswerter Weise Zeugnis dafür ab, mit welchem Scharfsinn Newton die Naturerscheinungen auffaßte. Als dreihundert Jahre später Strahlen entdeckt wurden, die wirklich so beschaffen sind, wie sich Newton die Lichtstrahlen vorgestellt hatte, wurden sie zunächst für eine besondere Art von Lichtstrahlen gehalten. Die α-Strahlen der Korpuskulargruppe und die X-Strahlen der Wellenstrahlengruppe lassen sich nur durch sehr kräftige Agentien und mit Hilfe der feinsten Meßinstrumente, über die wir heute verfügen, von einander unterscheiden.

Zwei Jahre nach der Entdeckung der Radioaktivität im Uran wurde nachgewiesen, daß das Element Thor dieselbe Eigenschaft ungefähr in gleichem Grade besitzt. In demselben Jahre überzeugte sich Frau Curie, daß von allen bekannten Elementen nur diese beiden die Eigenschaft der Radioaktivität besitzen, aber sie kam bei ihren Untersuchungen auf die Vermutung, daß das Mineral Pechblende (Uranpecherz) ein neues stark radioaktives Element enthält. Dieses Mineral enthält oft 80 Prozent Uranoxyd, aber es ist mehrmals so stark radioaktiv als Uranoxyd oder Thoroxyd im reinen Zustand. Nach jahrelanger, in Gemeinschaft mit Herrn Curie und Herrn Bemont ausgeführter Arbeit, bei welcher die Radioaktivität die Mittel lieferte, um das neue Element aufzufinden, wurde eine winzige Menge desselben in Form des Chlorids aus der Pechblende in reinem Zustande abgeschieden und mit dem Namen Radium belegt. Das Mineral enthält wahrscheinlich weniger als den millionten Teil seines Gewichtes Radium, denn es mußten viele Tonnen des Minerals verarbeitet werden, bis man so viel von dem neuen Element gewonnen hatte, um es untersuchen zu können. Die Radioaktivität des neuen Elementes ist dagegen enorm, nämlich mindestens das millionenfache von der Radioaktivität des Urans oder des Thors. Frau Curie erkannte ferner, daß die Pechblende noch ein anderes neues

Element enthält, welches sie Polonium nannte, und Debierne entdeckte ein drittes, das Aktinium. Beide sind in der Pechblende enthalten, aber in so geringer Menge, daß es bis jetzt noch nicht gelungen ist, sie zu isolieren. Dagegen ist das Radium in hinreichender Menge isoliert worden, um das Atomgewicht zu bestimmen und die Spektralreaktion beobachten zu können. Hierdurch ist aber die elementare Natur desselben außer Frage gestellt. Für das Atomgewicht des Radiums fand Frau Curie den Wert 225. Die Atomgewichte von Thor und Uran sind bezw. 232 und 238, und diese drei sind die höchsten Atomgewichte, welche man kennt. Die Radioaktivität ist also eine Eigenschaft der drei schwersten Atome, welche man gegenwärtig kennt.

Weshalb auch das Polonium und das Aktinium als Elemente betrachtet werden müssen, trotzdem es noch nicht gelungen ist, sie zu isolieren, verdient etwas näher begründet zu werden. Radioaktivität ist eine Eigenschaft des Atoms des betreffenden Elementes, die durch kein bekanntes Mittel dem Grade oder der Qualität nach geändert werden kann. Sie kann mit Hilfe der elektrischen Methode in Mengen eines Elementes entdeckt werden, die viel zu klein sind, um direkt nachgewiesen werden zu können. Die Spektralreaktion des Radiums ist äußerst charakteristisch und leicht zu beobachten. Wenn aber die Menge des Radiums

so gering ist, daß sie nicht mehr durch die Spektralreaktion erkannt werden kann, so ist sie immer noch leicht durch die Radioaktivität nachzuweisen. Selbst der millionte Teil der geringsten Menge, die noch durch die Spektralreaktion zu erkennen ist, macht sich durch seine Radioaktivität bemerkbar. Die Natur der Radioaktivität eines Elementes ist nicht nur eine unveränderliche Eigenschaft dieses Elementes, sondern sie kann auch dazu dienen, das Element von anderen Elementen, welche diese Eigenschaft besitzen, zu unterscheiden. Es ist z. B. nicht möglich, daß die Aktivität von Uran durch eine Spur von beigemengtem Radium verursacht ist. Polonium unterscheidet sich von allen übrigen radioaktiven Elementen dadurch, daß seine Strahlung nur aus den α-Strahlen besteht. Das Aktinium wird an einer charakteristischen Emanation erkannt, die ihre Aktivität viel schneller verliert, als die Emanationen des Thors und des Radiums. Es gibt also mindestens fünf verschiedene Arten von Radioaktivität, folglich müssen auch ebensoviele radiaktive Elemente existieren. Es ist interessant, daß man zu diesem Schluß gekommen ist, ohne irgend eine chemische Eigenschaft der betreffenden Materie zur Begründung dieses Schlusses heranzuziehen. Ein neues Radioelement läßt sich mit Hilfe der angegebenen Mittel erkennen, auch wenn von der betreffenden Substanz noch nicht so viel dargestellt

worden ist, als zur Beobachtung der Spektralreaktion, zur Bestimmung des Atomgewichtes und zur Ermittelung irgend einer chemischen Eigenschaft erforderlich ist. Diese Eigenschaften lassen sich, wie beim Radium, später ermitteln, wenn eine hinreichende Menge des Elementes angesammelt worden ist. Diese Menge wird aber etwa das billionenfache derjenigen Menge sein, die zu einer vollständigen Untersuchung der radioaktiven Eigenschaften erforderlich ist.

Die fünf genannten Elemente unterscheiden sich ganz bedeutend durch den Grad ihrer Radioaktivität. Uran und Thor sind so schwach aktiv, daß man sie ungefähr ein Jahrhundert lang hat studieren können, ohne ihre Radioaktivität zu bemerken. Daß das Radium existiert, wurde aus seiner starken Aktivität geschlossen, und lange Zeit bildete diese den einzigen Beweis, den man für die Existenz dieses Elementes geltend machen konnte, und was das Aktinium und das Polonium betrifft, so sind unsere Kenntnisse bis jetzt noch nicht über dieses Stadium hinausgekommen. Aber die α-Strahlen zeigen bei allen fünf Elementen im allgemeinen denselben Charakter, und alle mit Ausnahme des Poloniums senden β-Strahlen und wahrscheinlich auch γ-Strahlen aus. Die Strahlungen sind zwar bei den verschiedenen Elementen von etwas verschiedenem Charakter, allein diese Ver-

schiedenheit ist nicht sehr groß. Es leuchtet ein, daß sich die Verschiedenheit der Stärke der Radioaktivität bei verschiedenen radioaktiven Elementen nicht anders erklären läßt, als durch die Annahme, daß von der Gewichtseinheit der verschiedenen Elemente in der Zeiteinheit eine verschiedene Anzahl von Teilchen ausgesandt wird. Die Aussendung der α-Teilchen zeigt bei den einzelnen Radioelementen keine Verschiedenheit. Rutherford war der erste, der die große Bedeutung der α-Strahlung für die Erscheinungen der Radioaktivität erkannte. Er zeigte, daß sie wahrscheinlich in allen Fällen über 99 Prozent der ausgestrahlten Energie ausmacht, daß also die von den β-Strahlen und den γ-Strahlen zusammen ausgestrahlte Energie nur einen geringen Bruchteil der gesamten Strahlung bildet. Wir wissen jetzt, daß die β-Strahlen und die γ-Strahlen hinsichtlich der Zeit sekundäre Erscheinungen sind. Die Ausstrahlung der α-Teilchen leitet den Vorgang ein, die Aussendung der β-Teilchen und der γ-Strahlen erfolgt erst viel später, wenn der Vorgang sich seiner Vollendung nähert.

Eine theoretische Erklärung der Ursache und der Natur der Radioaktivität wurde von Professor Rutherford und mir gegeben. Sie war das Ergebnis einer Untersuchung der Radioaktivität des Thors, die ausgeführt wurde, bevor die korpuskulare Natur der α-Strahlung bekannt war. Der Einfach-

heit halber soll hier die fertige Theorie*) ohne Rücksicht auf ihre historische Entwickelung betrachtet werden. Es wird angenommen, daß die Elemente, welche Radioaktivität zeigen, eine langsame spontane Umwandlung in andere Elemente erleiden. Die Umwandlung ist nur mit Rücksicht auf die Masse des Materials eine langsame, indem in der Zeiteinheit nur ein äußerst winziger Bruchteil der gesamten Masse eine Umwandlung erleidet. Für die einzelnen Atome dagegen besteht die Umwandlung in einem plötzlichen Zerfallen oder Zerspringen. Die α-Teilchen sind kleine Fragmente der zerfallenden Atome, die mit ungeheurer Energie nach allen Richtungen hin in den Raum geschleudert werden. Durch den Flug dieser Teilchen wird die α-Strahlung erzeugt, und wenn sie angehalten werden, so bringen sie alle die bekannten Wirkungen hervor, durch welche die Strahlen erkannt werden können. Es entsteht z. B. Fluoreszenz, wenn die Teilchen ein Hindernis treffen, welches imstande ist, so schnell zu schwingen, daß Lichtstrahlen entstehen. Die Ionisierung von Gasen wird durch das Zusammenstoßen der α-Teilchen mit den neutralen Molekülen des Gases hervorgerufen, wobei die letzteren in entgegengesetzt geladene Teilchen oder „Ionen“ zerfallen oder dissoziiert werden. In den meisten

*) Phil. Mag. 1902, VI, 4, p. 370 u. 569; 1903, VI, 5, p. 441, 445, 561 u. 576.

Fällen und bei jedem beliebigen Hindernis wird die Energie der α-Teilchen in Wärme umgewandelt. Dies ist im letzten Jahre von Herrn Curie und Herrn Laborde durch den Versuch nachgewiesen worden. Sie fanden, daß ein festes Radiumpräparat sich auf einer Temperatur erhält, die die Temperatur der Umgebung um einige Grad übersteigt. Die α-Strahlen werden, wie wir gesehen haben, sehr leicht zurückgehalten. Sie werden z. B. von einem Blatt Papier vollständig absorbiert. Da sie nun gleichmäßig durch die ganze Masse der radioaktiven Substanz hindurch erzeugt werden, so ist eine Wirkung wie die erwähnte zu erwarten. Das Radium erwärmt sich unter dem Einfluß des Bombardements seiner eigenen α-Strahlen, dem es fortwährend ausgesetzt ist, ebenso wie sich eine Scheibe erwärmen würde, die in der Schußlinie eines Maximgeschützes aufgestellt wird. Es fragt sich also nur, woher das α-Teilchen seine ungeheure Energie ursprünglich bekommt.

Es wäre jedenfalls sehr schwierig gewesen, den experimentellen Beweis dafür zu erbringen, daß die Ursache der Radioaktivität in dem Zerfallen der Atome zu suchen ist, wenn die Erscheinung nicht etwas komplex gewesen wäre. Die Komplexität der Radioaktivität, wie sie namentlich beim Thorium hervortritt, hat es ermöglicht, eine Auffassung von solcher Tragweite einer strengen

experimentellen Prüfung zu unterziehen. Der Vorgang des Zerfallens, wenigstens soweit er das einzelne Atom betrifft, ist dem plötzlichen Zerfallen der Moleküle einer explosiven Substanz wie Acetylen oder Knallquecksilber zu vergleichen. Der Unterschied zeigt sich, wenn wir die gesamte Masse der Substanz anstatt des einzelnen Teilchens betrachten. Bei einer explosiven Verbindung bewirkt das Zerfallen eines einzelnen Teilchens das Zerfallen der benachbarten Teilchen, und die ganze Verbindung explodiert in einem verschwindend kleinen Zeitraum. Bei einem radioaktiven Element dagegen zerfällt in der Zeiteinheit nur ein bestimmter und kleiner Teil des Ganzen, ohne auf die Geschwindigkeit des Zerfallens des Restes beschleunigend einzuwirken. Dieser Zersetzungsprozeß verläuft in dieser Weise bei allen bekannten Arten von unbeständigen Atomen. Die relative Menge der zerfallenden Teilchen ist bei den verschiedenen Arten außerordentlich verschieden, aber für jede Art bestimmt und unabhängig von den kräftigsten chemischen und physikalischen Agentien, deren Einwirkung die Substanz unterworfen werden kann. Wenn nun das zerfallende Atom aus seinem Anfangszustand durch eine einzige Umwandlung in den Endzustand überginge, wie es bei den erwähnten molekularen Vorgängen der Fall ist, so wäre es schwierig gewesen, den Vorgang näher aufzuklären.

Dies ist jedoch glücklicherweise nicht der Fall. Das Thoratom durchläuft, bevor es den Endzustand erreicht, mindestens fünf getrennte und aufeinander folgende Zersetzungsprozesse. Jeder derselben erfolgt plötzlich und explosionsartig und besteht in der Ausstrahlung von Fragmenten in der Form von α-Teilchen. Auch beim Radium erleidet jedes Atom wahrscheinlich fünf getrennte Zersetzungen, während man beim Uran bis jetzt nur zwei Stadien kennt.

Die vollständige Umwandlung des zerfallenden Atoms erfordert demnach eine beträchtliche Zeit. Infolgedessen existiert eine gewisse Anzahl von kurzlebigen Übergangsformen zwischen den ursprünglichen Atomen und den Atomen, in die sie umgewandelt werden. Von Professor Rutherford und mir wurde für derartige unbeständige Atome der Name „Metabolon" vorgeschlagen. Dieser Name bezeichnet den wesentlichen Charakter dieser Atome sowie das Mittel zu ihrer Auffindung. Ein Metabolon ist ein Atom von begrenzter Lebensdauer. Solange es existiert, ist es ein normales Atom, welches die gewöhnlichen Eigenschaften der Materie besitzt. In dem Augenblicke seiner plötzlichen Umwandlung zeigt es die Eigenschaften der Radioaktivität.

Es mag zunächst ein naheliegender Einwand zurückgewiesen werden, nämlich der Einwand, daß das Wort Atom „unteilbar" bedeutet, und daß

daher ein „zerfallendes Atom“ eine sprachliche Absurdität ist, weil ein Teilchen, welches eine Umwandlung erleidet, ipso facto kein Atom sein kann. Diesem Schlusse liegt der Gedanke zugrunde, daß ein unveränderliches Ding sich tatsächlich nicht ändert. In demselben Sinne wie das Atom ist aber z. B. das Wetter unveränderlich, weil es uns bei dem einen ebensowenig wie bei dem anderen gelungen ist, eine Veränderung zu bewirken. Man muß scharf unterscheiden zwischen der persönlichen Unfähigkeit und der natürlichen Unmöglichkeit. In diesem Sinne steht das Metabolon mit dem chemischen Begriff des Atoms nicht in Widerspruch. Es verwandelt sich, aber wir sind nicht imstande, diese Verwandlung zu hemmen oder den Betrag derselben zu beeinflussen. Die Ursache der Veränderung liegt außerhalb des Bereiches unserer Kontrolle.

Diese Auffassung der Radioaktivität erklärt ohne weiteres das, was man den dualistischen Charakter der radioaktiven Materie nennen kann, je nachdem es sich um die gewöhnlichen Eigenschaften oder um die radioaktiven Eigenschaften der Materie handelt. Die Chemie des Urans oder des Thors bietet nichts Abnormes, was mit ihrer Radioaktivität in Zusammenhang gebracht werden kann. Das Radium ist nach seinem Atomgewicht, nach seiner Spektralreaktion und nach seinem

chemischen Verhalten ein vollkommen normales Glied der Familie der alkalischen Erden. Eine kürzlich von Runge und Precht ausgeführte Untersuchung des Spektrums hat in bemerkenswerter Weise die nahe Verwandtschaft des Radiums mit Barium, Strontium und Calcium offenbart. Die drei Radioelemente haben in chemischer Hinsicht keine Ähnlichkeit untereinander. Das hohe Atomgewicht ist ihre einzige gemeinsame Eigenschaft. Diese Tatsachen bestätigen eine Ansicht, für die wir im folgenden noch weitere Beweise finden werden, daß nämlich die Lebensdauer und folglich auch der Grad der Radioaktivität, den das betreffende Element zeigt, mit seinen chemischen Eigenschaften nicht zusammenhängt. Ja selbst ein Zusammenhang mit der Masse des Atoms, etwa in dem Sinne, daß die Radioaktivität mit der Masse zunimmt, ist nicht vorhanden. Da sich unsere Beobachtung des Entwickelungsprozesses, der seit undenklichen Zeiten im Gange ist, nur auf einen kurzen Zeitraum erstreckt, so ist unsere Kenntnis der unbeständigen Atome notwendigerweise natürlich eine beschränkte. Von allen möglichen Gruppierungen des „Urstoffes“ bilden die Atome des periodischen Gesetzes wahrscheinlich nur eine beschränkte Anzahl, nämlich die Formen von der längsten Lebensdauer, die heute existieren, weil sie einen langen Entwickelungsprozeß durchgemacht haben, in welchem die physikalisch un-

tauglichen verschwunden sind. Die bereits erwähnten Übergangsformen repräsentieren andrerseits die elementaren Formen der Materie, die physikalisch untauglich sind weiterzuleben, die aber in den Bereich unserer Beobachtung kommen, weil sie die vorübergehenden Haltestellen bilden, welche die Materie im Verlaufe einer langsamen kontinuierlichen Entwickelung von den schwereren zu den leichteren Formen passiert. Die ursprünglichen radioaktiven Elemente können als die Verbindungsglieder zwischen den beiden Gruppen bezeichnet werden, die als solche die Eigenschaften jéder der beiden Gruppen besitzen. Sie sind in einer Umwandlung begriffen, die sich aber so außerordentlich langsam vollzieht, daß einige von ihnen noch existieren. Etwas, was hier aufgeklärt werden muß, ist der Umstand, daß zwischen der Lebensdauer eines Atoms und seinen materiellen Eigenschaften, soviel wir wissen, kein erkennbarer Zusammenhang besteht. Dies ergibt sich aus dem Studium der Übergangsformen. Solange das Metabolon existiert, einerlei ob längere oder kürzere Zeit, verhält es sich wie ein gewöhnliches Atom. Das Herrannahen des Endes gibt sich in keiner Weise zu erkennen, sondern infolge einer inneren Umwälzung, über deren Ursache wir kaum eine Vermutung haben können, fliegt das Metabolon plötzlich auseinander und hört auf, als selbständiges Atom zu existieren.

Die Radioaktivität ist eine Eigenschaft, die einem Körper in einem gegebenen Augenblick nur von wenigen Atomen erteilt wird. Bei weitem der größte Teil des Körpers besteht aus gewöhnlichen inaktiven Atomen von spezifischer und charakteristischer materieller Natur, die von den hinzukommenden Eigenschaften der im Zerfallen begriffenen Fraktion nicht beeinflußt wird, und die auch auf diese Eigenschaften keinen Einfluß ausübt. Eine Eigenschaft, die dem ganzen Körper durch eine konstante Fraktion erteilt wird, ist aber bei vielen Wirkungen von einer Eigenschaft, die allen Atomen gemeinsam ist, nicht zu unterscheiden. Daher faßte Frau Curie in ihren früheren Untersuchungen jedes Atom eines radioaktiven Körpers als eine konstante Energiequelle auf. Infolge der Entdeckung der Übergangsformen ist diese Auffassung gegenstandslos geworden. Die Entscheidung zwischen diesen beiden Auffassungen kommt auf nichts geringeres hinaus als die Entscheidung der Frage, ob die Materie eine diskontinuierliche oder eine kontinuierliche Struktur besitzt. Im letzteren Falle würden die gesamten Erscheinungen der Radioaktivität ein Rätsel sein. Eine schrittweise Änderung, bei dem jeder Schritt mit einem plötzlichen Wechsel der Erscheinungen verbunden ist, der sich aber doch nach und nach durch die ganze Masse fortpflanzt, macht eine

atomistische Hypothese notwendig, und die Ausstrahlung von Materie in den Raum ist nur verständlich, wenn die fortgeschleuderte Materie aus getrennten Teilchen besteht. Die Erscheinungen der Radioaktivität werfen neues Licht auf die Natur dieser Atome und bilden eine bemerkenswerte Bestätigung der Theorie, welche Dalton vor hundert Jahren in dieser Gesellchaft aufgestellt hat. Heute wissen wir über die Atome mehr als Dalton. Aus der unermeßlichen Mannigfaltigkeit der Erscheinungen, welche die Entstehung und die Zerstörung des Atoms begleiten, wissen wir, daß es unter gewöhnlichen Umständen, wie z. B. in dem gesamten Gebiete der Chemie, die wahre Umwandlungseinheit ist. Zugleich hat sich durch die Entdeckung der Radioaktivität eine neue Welt eröffnet, in welcher das Atom nicht die Einheit ist, in der die Kräfte keine chemischen sind, in welcher die gewöhnlichen physikalischen Begriffe wie Temperatur keine Bedeutung haben. Je weiter wir in diese unteratomige Welt eindringen, desto mehr erkennen wir, wie weit sie von dem Gebiet atomistischer und molekularer Betrachtungen entfernt ist. Wir können allerdings den Vorgang der unteratomigen Umwandlung nur als Zuschauer beobachten, aber nicht in denselben eingreifen, und aus dem eigenartigen Charakter der Erscheinungen geht deutlich hervor, daß das Atom Daltons ein sehr reales und bestimmtes Stadium in der Mannig-

faltigkeit der Materie repräsentiert, welches unter allen gewöhnlichen Umständen erhalten bleibt. Man kann sagen, daß die Theorie, welche Dalton der modernen Chemie zugrunde legte, durch die Entdeckung der Natur der unteratomigen Umwandlung eine positive Bestätigung erfahren hat.

Rutherford und ich haben in den bereits erwähnten Abhandlungen nachzuweisen versucht, daß die Erscheinungen der Radioaktivität notwendigerweise zu der Annahme des Zerfallens der Atome führen. Hier muß eine weniger strenge Behandlung des Problems genügen, und wir wollen die Beweisführung umkehren. Wir wollen die Möglichkeit des Zerfallens der Atome annehmen und zeigen, daß die Erscheinungen der Radioaktivität eine notwendige Konsequenz dieser Annahme bilden. Da der Prozeß durch keine bekannte Kraftwirkung beeinflußt wird, müssen wir annehmen, daß er sich seit undenklichen Zeiten für jede beliebige Art von Materie fortwährend in demselben Grade vollzogen hat, wie er sich auch heute noch vollzieht. Wenn sich aber etwas von der zerfallenden Materie bis auf den heutigen Tag erhalten sollte, so mußte sich dieser Prozeß des Zerfallens außerordentlich langsam vollziehen. Die ursprüngliche Form der Materie soll als das Urelement bezeichnet werden. Für jede gewöhnliche Menge des Urelementes und für jeden gewöhnlichen Zeitraum muß die durch das

Zerfallen entstehende Menge der Übergangsformen der Materie äußerst gering gewesen sein. Ferner kann sich die Menge der erzeugten Übergangsform nicht über einen gewissen Grenzwert oder Gleichgewichtswert hinaus anhäufen. Dieser Grenzwert wird erreicht, wenn die Menge, welche sich in einer Sekunde umwandelt, ebenso groß ist wie die Menge, welche in einer Sekunde entsteht. Dieser Zustand soll das radioaktive Gleichgewicht genannt werden. Da die Erzeugung der Übergangsform langsam, die Umwandlung daselbst schnell erfolgt, so muß die Gleichgewichtsmenge stets verschwindend klein sein, viel kleiner als sie sein müßte, wenn es möglich sein sollte, sie mit Hilfe gewöhnlicher Methoden zu entdecken. Aber die große Geschwindigkeit, mit der die Umwandlung der Übergangsform erfolgt, und die Ausstrahlung der α-Teilchen, von der die Umwandlung begleitet ist, bilden ein Mittel, durch welches diese Übergangsformen leicht entdeckt und studiert werden können, obgleich sie nur in so geringen Mengen anwesend sind, daß sich ihre Existenz in keiner anderen Weise bemerkbar macht.

Ob sich eine Übergangsform experimentell nachweisen läßt oder nicht, hängt lediglich davon ab, ob die von der Gewichtseinheit in der Zeiteinheit freigemachte Energie hinreichend groß ist und sich in einer Form geltend macht, die wir mit

Hilfe unserer Instrumente entdecken können. Daß die beim Zerfallen des Atoms freiwerdende Energie ungeheuer groß ist, wird durch die Tatsache bewiesen, daß ein Gramm Radium jahraus jahrein in der Stunde 100 Kalorien entwickeln kann, ohne daß sich in irgend einer Weise eine Verminderung der Masse bemerkbar macht. Wie wir gesehen haben, läßt sich der millionste Teil derjenigen Menge Radium, die spektroskopisch nachweisbar ist, noch an ihrer Radioaktivität, an ihrer Energieausstrahlung erkennen. Wenn sich diese Energieausstrahlung nicht, wie es beim Radium ohne Zweifel der Fall ist, auf Jahrhunderte verteilte, sondern wenn sie sich in einem Zeitraum von einigen Sekunden bis zu einigen Wochen vollzöge, wie bei den am besten bekannten Metabolen der Fall ist, so würde die Energieausstrahlung in der Zeiteinheit entsprechend größer sein, und es würde eine entsprechend kleinere Menge in das Bereich unserer Beobachtung kommen. Die Mengen der kürzlich entdeckten Übergangsformen, die zu unserer Kenntnis kommen, werden zweckmäßiger in Vielfachen der Anzahl von Atomen als in Gramm oder einer anderen Gewichtseinheit ausgedrückt. Die Energie eines einzelnen α-Teilchens läßt sich aus seiner Masse und seiner Geschwindigkeit berechnen. Sie ist 10^{-5} bis 10^{-6} Erg, was sicherlich nicht weit unterhalb der Grenze liegt, bis zu welcher die

elektrische Methode brauchbar ist. Es ist allerdings noch eine offene Frage, ob die von Sir William Crookes*) entdeckte Szintillation in der Phosphoreszenz von Zinksulfid, welches den α-Radiumstrahlen ausgesetzt wird, durch die Stöße der einzelnen Teilchen verursacht wird, ob also tatsächlich die Wirkungen einzelner materieller Atome zu unserer Kenntnis kommen.

Die folgende Tabelle gibt den Verlauf des Zerfallens von den drei am besten studierten Radioelementen an, soweit er experimentell festgestellt ist.

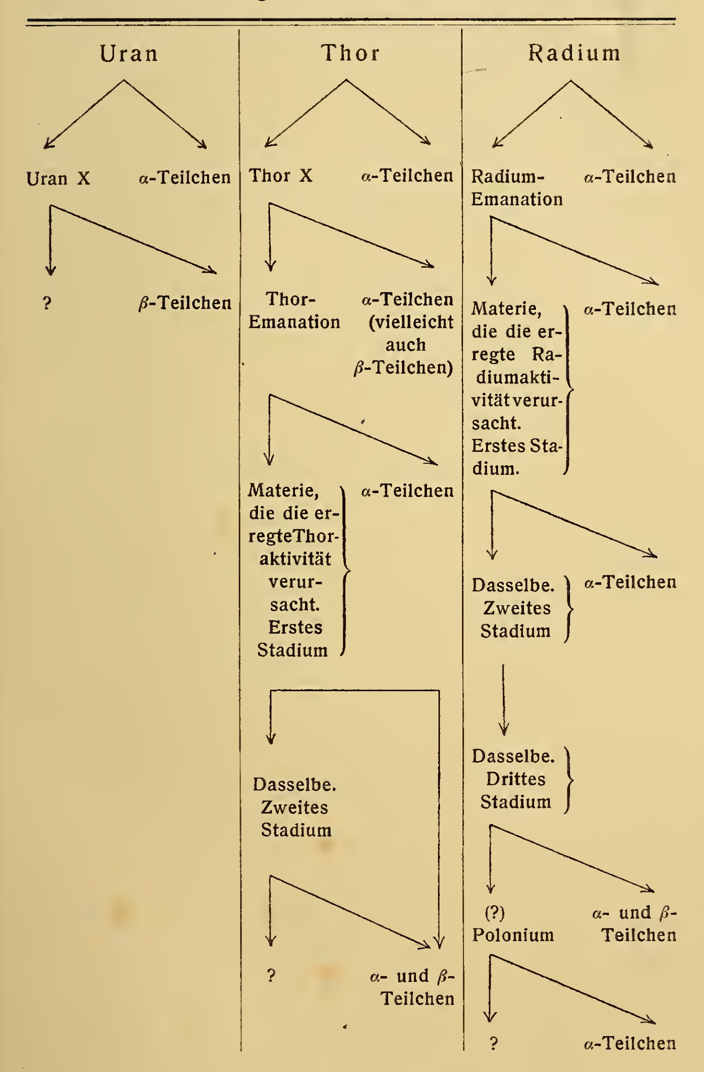
Es hat seine großen Schwierigkeiten, für jede der zahlreichen Übergangsformen, welche man jetzt kennt, einen passenden Namen zu bilden. Rutherford hat kürzlich für die Materie, welche die „erregte“ oder „induzierte“ Aktivität von Radium und Thor verursacht, den Namen „Emanation X“ vorgeschlagen. Eine eingehende Beschreibung der verschiedenen neuen Körper kann hier nicht gegeben werden. Ebensowenig kann hier näher beschrieben werden, wie man sie von den Elementen, aus denen sie entstehen, getrennt hat. Für diese Trennungen ist die gewöhnliche materielle Natur der Körper maßgebend, und sie lassen sich mit Hilfe einiger der gewöhnlichen Methoden der chemischen Analyse

*) Elster und Geitel haben selbständig dieselbe Erscheinung an der aus der Luft gewonnenen radioaktiven Materie entdeckt.

bewerkstelligen. Am genauesten sind die Emanationen und die aus ihnen entstehenden weiteren Umwandlungsprodukte studiert worden. Da nämlich die ersteren gasförmig sind, lassen sie sich nach und nach durch Diffusion (Emanation) von den Elementen trennen, aus denen sie entstehen. Der Umstand, daß sich die Emanationen bei der Temperatur der flüssigen Luft verdichten, bietet ein Mittel, sie von anderer gasförmiger Materie zu befreien, und hat, wie wir später sehen werden, eine wesentliche Erweiterung unserer Kenntnisse zur Folge gehabt.

Sämtliche Übergangsformen haben dieselben allgemeinen Eigenschaften. Sie können, wie wir gesehen haben, nur auf eine unendlich kleine Quantität anwachsen und werden an ihrer großen Umwandlungsgeschwindigkeit erkannt. Ihre Energie wird daher schnell zerstreut. Die Radioaktivität nimmt mit der Zeit in geometrischer Progression bis Null ab. Die Geschwindigkeit dieser Abnahme bietet ein Mittel, die Geschwindigkeit der Umwandlung zu messen, und sie ist eine unveränderliche Eigenschaft der betreffenden Materie. Unter gewöhnlichen Umständen werden die Strahlungen eines Radioelementes, welches den radioaktiven Gleichgewichtszustand erreicht hat, zum größten Teil von den Übergangsformen, in die es zerfällt, hervorgebracht. Nur ein kleiner Teil wird durch das zu-

Umwandlung radioaktiver Elemente.



nächst eintretende Zerfallen des Atoms selbst erzeugt. Allein dieser Teil läßt sich nicht durch chemische Mittel isolieren, da sich nicht verhindern läßt, daß in jeder Sekunde ein gewisser Bruchteil der Gesamtzahl der Atome des Urelementes zerfällt. Dies ist die „nicht trennbare Radioaktivität". Da der Bruchteil des zerfallenden Urelementes verschwindend klein ist, so nimmt die Menge desselben nicht merklich ab. Eine Abnahme der nicht trennbaren Aktivität ist daher auch im Laufe langer Zeiträume nicht wahrzunehmen.

Die Operation der Trennung der Übergangsformen von dem Urelement durch chemische Mittel beeinflußt den Verlauf des Zerfallens in keiner Weise. Sich selbst überlassen erzeugt das Urelement immer wieder einen neuen Vorrat von Übergangsformen, während die abgeschiedenen Mengen infolge weiterer Umwandlung verschwinden. Während die Aktivität des Urelementes wieder seinen Maximal- oder Gleichgewichtswert erreicht, nimmt die Aktivität der Übergangsformen bis Null ab, und der Gesamtbetrag ist immer ebensogroß, wie er auch sein würde, wenn keine Abtrennung stattgefunden hätte.

Da durch die Radioaktivität ein Zerfallen von Atomen angezeigt wird, haben wir durch sie eine ganze Reihe von neuen unbeständigen Elementen kennen gelernt, die sich gegenwärtig nicht in das periodische System einreihen lassen, da wir, abge-

sehen vom Radium, ihre chemischen Eigenschaften zu wenig kennen. Sie sind das Produkt einer Entwickelung, deren Anfangsstadium so langsam verläuft, daß es trotz der langen Zeit, die seit Beginn desselben verflossen ist, noch nicht beendet ist. Sobald aber das Anfangsstadium sein Ende erreicht hat, folgen die weiteren Entwicklungsstadien so schnell aufeinander, daß fast alles, was wir gegenwärtig über die Zwischenformen wissen, aus den Energieerscheinungen abgeleitet ist, die das Auftreten und das Verschwinden dieser Zwischenformen markieren. Allein diese Erscheinungen, namentlich die Aussendung von Strahlen, sind so charakteristisch und so geeignet für ein genaues Studium, daß unsere Kenntnisse keineswegs dürftig zu sein brauchen, obwohl sie ganz anderer Art sind als bei der gewöhnlichen Materie. Wir befinden uns in einer neuen Wissenschaft, und die Beziehung derselben zu anderen Wissenschaften ist für ihre eigne Entwicklung von untergeordneter Bedeutung. Dies zeigt sich sofort, wenn man die Mittel zur Entdeckung und Unterscheidung der verschiedenen Metabolontypen mit den Mitteln vergleicht, die bei den stabilen Atomen Anwendung finden. Hier dienen das Atomgewicht, die Spektralreaktion sowie die allgemeinen chemischen und physikalischen Eigenschaften als Unterscheidungsmerkmale. Bei einem Metabolon kann die physikalische und chemische

Natur zuweilen ziemlich vollständig studiert werden. So besitzen z. B. die Emanationen die eigentümliche Eigenschaft, der absorbierenden Wirkung chemischer Reagentien zu widerstehen. Sie schließen sich also in ihrer Natur den inerten Gasen der Argonfamilie an. Sie können ferner durch ihre Verflüchtigungstemperatur und ihre Verdichtungstemperatur oder auch durch ihre Diffusionsgeschwindigkeit identifiziert werden. Dies sind jedoch etwas spezielle Fälle. Das wertvollste Unterscheidungsmerkmal von allgemeiner Anwendbarkeit ist die Umwandlungsgeschwindigkeit. Das allgemeine Gesetz besteht darin, daß sich in der Zeiteinheit ein bestimmter Bruchteil verwandelt. Unter der Radioaktivitätskonstanten, die man mit λ bezeichnet, versteht man die relative Menge einer radioaktiven Substanz, die sich in der Sekunde umwandelt. Die Emanationen von Radium und Thorium haben in ihren allgemeinen Eigenschaften große Ähnlichkeit, unterscheiden sich aber ganz bedeutend durch ihre Umwandlungsgeschwindigkeit. Für die Thoremanation ist λ ungefähr $^1/_{87}$, für die Radiumemanation dagegen ist sie nur gleich dem 6000. Teil dieses Wertes. Die Radioaktivitätskonstante ist durch die Abfallgeschwindigkeit der Aktivität der Übergangsform bestimmt. Die in einer Sekunde ausgesandte Anzahl von α-Strahlen, d. h. die Radioaktivität, ist ein Maß für die Anzahl der Metabole, die sich in der Sekunde umwandeln

und daher auch, weil sich in der Sekunde ein bestimmter Bruchteil umwandelt, für die Anzahl der unverändert bleibenden Metabole. Die Aktivität nimmt in geometrischer Progression mit der Zeit ab, und die Quantität wird dementsprechend kleiner. Bezeichnet J_0 die ursprüngliche Aktivität und J_t die Aktivität nach der Zeit t, so ist der Wert von λ durch die Gleichung

$$\frac{J_t}{J_0} = e^{-\lambda t} \text{ oder } {}^{e}\log \frac{J_t}{J_0} = -\lambda t$$

gegeben. Der Wert von J_t/J_0 ist gleich $1/2$, d. h. die Quantität sinkt auf die Hälfte des Anfangswertes bei der Thoremanation in ungefähr einer Minute, bei der Radiumemanation in ungefähr vier Tagen.

Noch nützlicher als die Radioaktivitätskonstante ist vielleicht der reziproke Wert derselben, der eine interessante physikalische Bedeutung hat. Er gibt die mittlere Lebensdauer des Metabolons in Sekunden an, wodurch die betreffenden Verhältnisse jedenfalls besser veranschaulicht werden als durch die Umwandlungsgeschwindigkeit. So ist die mittlere Lebensdauer des Metabolons für die Thoremanation 87 Sekunden, für die Radiumemanation 5,3 Tage. Die mittlere Lebensdauer eines Metabolons ist eine konstante, die zur experimentellen Identifizierung des Metabolons dieselben Dienste leistet wie bei einem stabilen Atom das Atomgewicht. Es mag hervorgehoben werden, daß die wirkliche Lebens-

dauer der verschiedenen Atome desselben unbeständigen Elementes alle Werte zwischen Null und Unendlich besitzt. Einige zerfallen im Laufe der ersten Sekunde ihres Daseins, und da sich während einer Sekunde nur ein Bruchteil des Ganzen verwandelt, so nimmt die Gesamtzahl der Metabole theoretisch niemals bis Null ab und bei einigen ist die Lebensdauer eine unbegrenzte. Dies bildet die erste Verschiedenheit in den Eigenschaften der einzelnen Atome desselben Elementes, die bis jetzt entdeckt worden ist. Sie ist der Verschiedenheit der Geschwindigkeiten vergleichbar, die nach der kinetischen Gastheorie die Moleküle eines Gases bei konstanter Temperatur besitzen. Es ist die Frage, ob nicht alle Eigenschaften der Atome Durchschnittseigenschaften sind, während die einzelnen Atome fortwährend mit großer Geschwindigkeit Phasen durchlaufen, die in chemischer und physikalischer Hinsicht sehr voneinander abweichen.

In der folgenden Tabelle sind die Werte für die mittlere Lebensdauer der am besten bekannten Metabole nebst den Werten für die mittlere Lebensdauer der sogenannten permanenten Radioelemente zusammengestellt. Auf die letzteren werden wir im folgenden noch zurückkommen.

Name	Mittlere Lebensdauer, $1/\lambda$.
Aktiniumemanation	5,7 Sekunden.
Thoremanation	87 Sekunden.
Erregte Radiumaktivität, letzte Stufe (Emanation X) . . .	43 Minuten.
Erregte Thoraktivität, letzte Stufe	16 Stunden.
Radiumemanation	5 Tage, 8 Stunden.
Thor X	5 Tage, 19 Stunden.
Polonium	ungefähr 16 Monate (?).
Aktinium	?
Radium	ungefähr 1500 Jahre.
Thor, Uran	ungefähr 1 000 000 000 Jahre.

Alle neueren Fortschritte, die wir in unserer Kenntnis der letzten Konstitution der Materie gemacht haben, haben einen gemeinsamen Ausgangspunkt. Die unter besonderen Umständen mit der Materie verbundene Energie ist mehr als die Materie selbst Gegenstand des unmittelbaren Studiums gewesen. Infolgedessen sind viel kleinere Mengen, als direkt wahrgenommen werden können, in das Bereich experimenteller Forschung gekommen. So ist es z. B. möglich geworden, in der Erscheinung der Leitfähigkeit von Gasen das „Ion“ oder das geladene Atom durch seine Ladung zu erkennen und von dem Rest zu unterscheiden, trotzdem seine Quantität selbst unter günstigen Umständen wahrscheinlich kleiner als der billionste Teil des Ganzen ist. Daher wissen wir, wie Professor J. J. Thomson hervorgehoben hat, über das Ion viel mehr als über das ungeladene Molekül. Ferner, wenn das

Ion der Wirkung einer hinreichend starken elektrischen Anziehung oder Abstoßung ausgesetzt wird, so kann es in solchem Grade kinetische Energie annehmen, daß sich seine Gegenwart bemerkbar macht, selbst wenn es in so kleiner Menge auftritt, daß es unmöglich sein würde, seine Ladung experimentell nachzuweisen. Dies ist der Fall, wenn das negative Ion unter den angegebenen Umständen zum Kathodenstrahlenteilchen wird. Beim Zerfallen der Metabole entstehen Ionen oder positiv und negativ geladene Teilchen, die spontan in Form von Strahlen mit Geschwindigkeiten fortgeschleudert werden, die größer sind als irgend eine Geschwindigkeit, die sich durch elektrische Kräfte erzeugen läßt. Bei der Vollkommenheit unserer Beobachtungsmethoden hat es daher den Anschein, als ob ein weiterer Fortschritt aufhören muß, wenn wir die Grenze der Teilbarkeit der Materie erreicht haben. Verliert aber das Ion seine Ladung, das strahlende Teilchen seine kinetische Energie oder das Metabolon seine Fähigkeit, weiter zu zerfallen, so sind sie sofort unserem Gesichtskreis entrückt. Die Materie bleibt, aber die Energie ist verloren, und wir müssen wieder direkte Methoden, das Spektroskop oder chemische Reaktionen zu Hilfe nehmen, aber diese würden unzureichend sein, selbst wenn sie billionenmal empfindlicher wären, als sie tatsächlich sind.

Dies war die Schwierigkeit, welche sich der Beantwortung der Frage entgegenstellte, welche

Endprodukte schließlich entstehen, wenn ein Radioelement die verschiedenen Stadien des Zerfallens durchlaufen hat, und die Materie wieder in einen stabilen Zustand gekommen ist. Das Problem kann in zwei verschiedenen Arten in Angriff genommen werden. Entweder muß die Zeit, während der sich die Produkte des Zerfallens ansammeln, hinreichend lange ausgedehnt werden, oder die Menge des verwendeten Materials muß entsprechend erhöht werden. Die erste Methode ist einer mehr unmittelbaren Anwendung fähig. Es muß nämlich angenommen werden, daß in den natürlichen Mineralien, die die Radioelemente enthalten, die Produkte des Zerfallens sich im Laufe langer Zeiten angesammelt haben und also in hinreichender Menge anwesend sind, um durch gewöhnliche Mittel entdeckt zu werden. Dies brachte uns, Professor Rutherford und mich, auf die Vermutung, daß Helium ein solches Produkt sei. Der Beweis für die Richtigkeit dieser Vermutung ist zwar ein indirekter, dabei aber ein sehr lehrreicher. Sir William Ramsay entdeckte 1895 zum erstenmal das Helium in Substanzen terrestrischen Ursprungs, nämlich in einigen Mineralien, und er wies darauf hin, daß es sich nur in denselben Mineralien findet, die auch Uran und Thor enthalten. Viele von ihnen enthalten wie wir jetzt wissen, auch Radium, so daß man sagen kann, daß Helium nur in denjenigen Mineralien vorkommt, welche die Radioelemente enthalten. Das Studium der chemischen

Eigenschaften des Heliums hat zu dem Ergebnis geführt, daß es ein Gas ist, welches ebenso wie das Argon einer Famlie von chemisch inerten Elementen angehört, von denen sich bis jetzt keine einzige Verbindung hat darstellen lassen. Das Helium ist ferner von allen bekannten Gasen das einzige, welches bis jetzt noch nicht verflüssigt worden ist, und der Ursprung seines Vorkommens in den Thor- und Uranmineralien, in denen es in einer eigentümlichen und unaufgeklärten Weise eingeschlossen oder „okkludiert" ist, war ein vollkommenes Rätsel. Aus dem Mineral kann es durch Erhitzen oder durch Lösen ausgetrieben werden. Wenn es aber einmal ausgetrieben ist, kann es nicht wieder absorbiert werden. In der Abhandlung von Rutherford und mir über die radioaktiven Emanationen von Radium und Thorium ist darauf hingewiesen worden, daß diese Gase, die ebenfalls durch ihre chemische Trägheit Ähnlichkeit mit dem Argon haben, häufig aus den trockenen Radium- und Thorverbindungen, aus denen sie entstehen, nicht austreten, sondern in ihnen aufgespeichert oder „okkludiert", aber durch Erhitzen oder Auflösen der betreffenden Verbindung ausgetrieben werden. Die Gase zeigen also ganz dasselbe Verhalten wie das Helium in den Mineralien, und es war zu erwarten, daß sich die Erscheinung in beiden Fällen in derselben Weise erklären lassen würde. Die Gase, welche sich durch die ganze Substanz

hindurch bilden, bleiben unter günstigen Umständen in der Substanz mechanisch eingeschlossen. Nach dieser Auffassung bildet das Helium die Aufspeicherung eines der Endprodukte der Umwandlung eines der in dem Mineral anwesenden zerfallenden Elemente.

Die Entdeckung des Radiums durch Frau Curie sowie die technische Darstellung desselben durch Herrn Giesel ermöglichten es, die Theorie einer experimentellen Prüfung zu unterwerfen. Die Aktivität des Radiums ist millionenmal größer als die Aktivität des Urans und des Thors, und das Element muß daher millionenmal schneller zerfallen. Das Radium ist, wie später gezeigt werden wird, wahrscheinlich eine Übergangsform, die sich langsam umwandelt, und die durch das Zerfallen eines der schwereren in der Pechblende enthaltenen Elemente entsteht. Die Untersuchung kann theoretisch so aufgefaßt werden, daß die verwendete Menge Radium eine äquivalente Menge des Minerals repräsentiert. Es konnte also eine große Menge des Materials verwendet und daher die Untersuchung nach der zweiten der beiden erwähnten Methoden ausgeführt werden. Die Versuche wurden im letzten Sommer von Sir William Ramsay und mir ausgeführt. Obgleich die Menge Radium, die wir verwenden konnten, gering war — bei zwei Versuchen 20 bezw. 30 Milligramm — repräsentierte sie doch den wesentlichen Teil von mindestens hundert Kilo-

gramm des ursprünglichen Minerals. Bevor der Versuch ausgeführt wurde, war das Radium einige Monate lang im trockenen Zustand aufbewahrt worden, in der Voraussetzung, daß sich das in dieser Zeit entstehende Helium im festen Zustande ansammeln und dann beim Lösen frei werden würde. Der Wasserstoff und der Sauerstoff, der dem Gas stets infolge der Zersetzung des Krystallwassers (Giesel) beigemengt ist, wurde durch eine teilweise oxydierte, glühende Kupferspirale entfernt. Dann wurden die Gase durch eine in flüssiger Luft stehende kapillare U-Röhre getrieben, um die Emanation und etwa vorhandenes Kohlenoxyd zu verdichten, und dann in eine Spektralröhre von sehr geringem Volum eingepreßt. Das Gas zeigte deutlich das Heliumspektrum. Daß eine kontinuierliche Erzeugung von Helium stattfindet, wurde durch den folgenden Versuch bewiesen. Die beiden Radiumlösungen wurden so lange aufbewahrt, bis sich die Emanation annähernd bis zum Eintritt des Gleichgewichtszustandes angesammelt hatte, was im Laufe von zwei bis drei Wochen geschieht. Die Emanation wurde zusammen mit dem gleichzeitig durch Wasserzersetzung entstehenden Wasserstoff und Sauerstoff abgepumpt, von den letzteren durch Kondensation mit flüssiger Luft und Abpumpen der flüchtigen Gase befreit. Wenn die Röhre erhitzt wurde, zeigte sich stets momentan ein Spektrum mit grünen Linien. Es ist wahrscheinlich das Spektrum der

Emanation, wird aber sofort durch die Verflüchtigung des Kohlendioxyds verlarvt, welches bei unseren ersten Versuchen nie ganz entfernt werden konnte. Bei Versuchen, mit denen wir noch beschäftigt sind, ist es uns gelungen, diese Schwierigkeit zu überwinden, und das Spektrum der Emanation bildet den Gegenstand eines eingehenden Studiums. Wenn das Spektrum der in einem zugeschmolzenen Rohr enthaltenen Emanation von Tag zu Tag beoachtet wird, so erscheint das Heliumspektrum und nimmt nach und nach an Helligkeit zu. Die charakteristische Linie D_3 erscheint in der Regel nach dem dritten Tag, und schließlich wird das vollständige Spektrum beobachtet. Dies Resultat ist jetzt wiederholt erzielt worden. Es beweist, daß das Helium eins der Produkte ist, die durch das Zerfallen der Emanation entstehen. Während sich die Emanation in der Spektralröhre in Helium verwandelt, entsteht aus dem Radium eine neue Menge Emanation, und dieser Prozeß schreitet immer weiter fort. Das Radium ist in der Umwandlung in Helium begriffen, und eine Übergangsform zwischen beiden ist die Emanation.

Ein solches Resultat konnte selbstverständlich nur durch Anwendung äußerst empfindlicher Untersuchungsmethoden erzielt werden. Bei den langwierigen und mühsamen Untersuchungen Sir William Ramsays und seiner Kollegen Dr. Collie und Dr. Travers über die seltenen Elemente der Atmosphäre sind außerordentlich empfindliche

Methoden ausgebildet worden, durch die man verschwindend kleine Mengen von Gasen leicht und sicher beobachten kann. Außerdem trug die außerordentlich empfindliche und charakteristische Spektralreaktion des Heliums viel dazu bei, das Resultat zu ermöglichen. Die kleinste Blase in der Spitze einer Kapillarröhre, etwa ein fünfhunderttausendstel Kubikzentimeter oder ein fünfhundermilliontel Gramm, konnte durch die angewandten Methoden mit Sicherheit erkannt werden. Die aus dem Radium wirklich erhaltene Menge war sicherlich nicht vielmal größer. Selbst die Erzeugung dieser geringen Menge Helium beweist, daß die Lebensdauer des Radiums nicht unbegrenzt sein kann, was Professor Rutherford bereits vorher aus Betrachtungen über die wahrscheinliche Zahl der aus einem Gramm Radium in der Sekunde ausgestrahlten α-Teilchen und der Gesamtzahl der in einem Gramm enthaltenen Atome geschlossen hatte. Auf diesen Punkt werden wir noch einmal zurückkommen. Zunächst mögen einige neuere Resultate, die Sir William Ramsay und ich erzielt haben, erwähnt werden.

Durch ähnliche Methoden wie diejenigen, deren wir uns beim Experimentieren mit kleinen Mengen Helium bedienten, haben wir das Volum einer gegebenen Menge Radiumemanation zu ermitteln versucht. Zwei Gründe sprechen dafür, daß das Volum kleiner ist als das Volum der erzeugten

Menge Helium. Erstens ist die Emanation viel dichter, und aus Messungen des Diffusionskoeffizienten, die von Professor Rutherford und Miß Brooks ausgeführt wurden, geht hervor, daß die Dichtigkeit ungefähr 80 (H = 1) ist. Zweitens sammelt sich die Menge nicht kontinuierlich an, sondern sie erreicht, wie bereits beschrieben wurde, im Laufe einiger Wochen einen Gleichgewichtswert. Die Gleichgewichtsmenge wird am besten durch die Zeit gemessen, die zur Bildung derselben erforderlich ist. Es läßt sich zeigen, daß die Gleichgewichtsmenge einer Übergangsform von Materie diejenige Menge ist, welche während der Periode der mittleren Lebensdauer des Metabolons erzeugt wird. Die Menge der Emanation, welche von einer Radiumverbindung bis zur Erreichung des Maximalwertes aufgespeichert wird, ist diejenige Menge, welche in 5,3 Tagen stetiger Entwickelung erzeugt wird. Die nach Ablauf dieser Zeit wirklich vorhandene Menge ist natürlich infolge der Verwandlung, die sie fortwährend erleidet, geringer. Aus unseren Versuchen hat sich ergeben, daß die Gleichgewichtsmenge der Emanation von 60 Milligramm Radiumbromid bei normaler Temperatur und normalem Druck ein Volum von 0,03 bis 0,04 Kubikmillimeter besitzt. Die wirkliche Menge des Radiums in der benutzten Verbindung ist nicht genau bekannt, aber man begeht wahrscheinlich keinen erheblichen Fehler, wenn man annimmt, daß

es ungefähr die Hälfte des Gewichtes der Verbindung ausmacht. Der Maximalbetrag von Emanation, die von einem Gramm Radium (Element) aufgespeichert wird, nimmt daher einen Raum von ungefähr einem Kubikmillimeter ein.

Das Volum von einem Gramm Wasserstoff ist gleich 11,2 Liter und würde, wenn das Molekül einatomig wäre, gleich 22,4 Liter sein. Ein Gramm Radium würde, wenn es in Form eines einatomigen Gases erhalten werden könnte, ein Volum von 22,4 : 225 = 0,1 Liter haben. Das Molekül der Emanation ist wahrscheinlich wie beim Argon einatomig, da es keine chemische Affinität zeigt. Bei der Dichtigkeit 80 würde das Atomgewicht der Emanation also 160 sein, und es kann aus jedem Atom Radium nicht mehr als ein Atom entstehen. In einem Kubikmillimeter der Emanation ist der hunderttausendste Teil der Anzahl von Atomen enthalten, die in einem Gramm Radium enthalten sind. Wenn ein Atom Radium ein Atom Emanation erzeugt, so folgt, daß der hunderttausendste Teil des Radiums in 5,3 Tagen zerfällt. Der Wert von λ ist daher 2×10^{-11}, und die mittlere Lebensdauer des Atoms beträgt 1500 Jahre. Dieser Wert ist allerdings nicht sehr genau und muß als eine vorläufige Schätzung angesehen werden. Läßt man ihn als Annäherung an den wahren Wert gelten, so können wir noch einen wichtigen Schritt weiter gehen.

Auch ohne diese Größe läßt sich die mittlere Lebensdauer des Radiumatoms theoretisch ableiten, wenigstens läßt sich ein größter und ein kleinster Wert angeben, zwischen denen sie liegen muß. Diese Unsicherheit hat ihren Grund in dem Umstand, daß wir bis jetzt die Anzahl der α-Teilchen nicht kennen, die von dem Atom jedesmal, wenn es zerfällt, ausgesandt werden. Natürlich muß es mindestens eins sein, und hierdurch ist die untere Grenze für die Lebensdauer gegeben. Wenn anderseits das Radiumatom vollständig in α-Teilchen zerfällt, so können nicht mehr als ungefähr 150 Teilchen entstehen, wodurch die Schätzung der oberen Grenze ermöglicht ist. Hierbei wurde die folgende Methode befolgt (vgl. z. B. Rutherford, Nature, 20. Aug. 1903). Die Energie des einzelnen Teilchens ist ungefähr 5×10^{-6} Erg. Man kann annehmen, daß das strahlende Teilchen bei weitem den größten Teil der Energie des zerfallenden Atoms besitzt, ebenso wie beim Abfeuern einer Kanone der größte Teil der Energie auf die Kugel übertragen und nur ein kleiner Teil in dem Rücklauf des Geschützes verbraucht wird. Dies gilt für jede beliebige Anzahl von Teilchen, die bei jedem Zerfallen fortgeschleudert werden. Wenn die von einem Gramm Radium in der Sekunde ausgestrahlte Energie (Curie und Laborde) durch die Energie des einzelnen Teilchen dividiert wird, so ergibt sich $2{,}4 \times 10^{11}$ als die Anzahl der Teilchen, die von einem Gramm Radium

in der Sekunde fortgeschleudert werden. Nun erfolgt das Zerfallen des Radiums in vier Stadien, und in jedem dieser Stadien werden α-Teilchen fortgeschleudert. Wenn daher in jedem Stadium nur ein Teilchen fortgeschleudert wird, so gibt der vierte Teil der Zahl, 6×10^{10}, die Anzahl der in einem Gramm Radium enthaltenen Atome an, die in einer Sekunde zerfallen. Dies ist die Schätzung des Maximums. Das Minimum ist ungefähr 40mal so klein. Professor J. J. Thomson*) hat aus Versuchen, die teils von ihm selbst, teils von Townsend ausgeführt wurden, abgeleitet, daß in einem Gramm Wasserstoff $8{,}7 \times 10^{23}$ Atome enthalten sind. Ein Gramm Radium enthält daher $3{,}4 \times 10^{21}$ Atome. Nach der Schätzung des Maximums ist also der Bruchteil des Radiums, der sich in einer Sekunde verwandelt, $1{,}7 \times 10^{-11}$, und die mittlere Lebensdauer ist daher gleich 2000 Jahren. Dies ist fast genau die Schätzung, welche man direkt aus dem Volum der Emanation abgeleitet hat, und das Resultat deutet darauf hin, daß bei jedem Zerfallen nur ein α-Teilchen fortgeschleudert wird.

Die Radiumemanation ist eine sehr interessante Art von Materie, da sich die Hälfte derselben in vier Tagen umwandelt. Daher wurde das Verhalten der kleinen Blase des Gases von Tag zu Tag untersucht. Bei einem Versuche nahm das Volum mit der Zeit annähernd mit derselben Ge-

*) Phil. Mag. 1903, VI, 5, p. 355.

schwindigkeit und nach demselben Gesetze ab wie die Aktivität. In ungefähr drei Wochen war das Volum so gut wie auf Null zusammengeschrumpft. Der Rest war nur noch ungefähr ein Prozent der ursprünglichen Menge. Es fragt sich nun, was aus dem verschwundenen Helium wird. Die Untersuchungen über diesen Punkt sind noch nicht abgeschlossen. Wie Rutherford vermutet, ist das α-Teilchen nichts anderes als ein Heliumatom, und da es mit einer Geschwindigkeit von 30000 Kilometern fortgeschleudert wird, so ist zu erwarten, daß es in das Glas eindringt und in diesem eingeschlossen bleibt. Wir haben tatsächlich gefunden, daß Glas, welches diesem Bombardement ausgesetzt und dann zerkleinert und erhitzt wird, Helium abgibt, wie durch die Spektralreaktion nachgewiesen werden konnte. Ein ähnlicher Versuch, der allerdings ein negatives Resultat ergab, ist von Curie und Dewar in den Chemical News vom 19. Februar 1904 beschrieben worden. Die Abnahme des Volums der Emanation erfolgt durchaus nicht gleichförmig, und wahrscheinlich zeigen verschiedene Glasarten ein verschiedenes Verhalten. Es scheint, daß bei einigen das Helium eindringt und langsam hindurchgeht, auch ohne daß das Glas erwärmt wird. Die betreffenden Untersuchungen sind jedoch noch nicht zum Abschluß gekommen und die erwähnten Resultate müssen daher als vorläufige angesehen werden.

Sobald man erkannt hatte, daß die Radioaktivität eines so wirksamen Elementes wie das Radium durch einen geringen Bruchteil der Gesamtzahl seiner Atome erzeugt wird, die in der Zeiteinheit zerfallen, konnte kein Zweifel mehr darüber bestehen, daß die in der Struktur des Atoms aufgespeicherte und beim Zerfallen desselben freiwerdende Energie ganz bedeutend größer ist als die in der Struktur des Moleküls aufgespeicherte Energie. Als Beweis für die Richtigkeit dieser Annahme können die von Professor Rutherford und Professor Barnes*) gemachten Beobachtungen über die von der Radiumemanation entwickelte Wärme geltend gemacht werden. Wenn nämlich die aus einer festen Radiumverbindung durch Wärme ausgetriebene Emanation in einem Glasrohr durch flüssige Luft kondensiert wird, so wird, wie die genannten Forscher festgestellt haben, die Wärmestrahlung des Radiums bedeutend vermindert, während jetzt der größere Teil von der Emanation ausgestrahlt wird. Dies steht mit der Theorie des Zerfallens der Atome vollkommen in Einklang. Da nun ungefähr drei Viertel der ausstrahlenden α-Teilchen von dem ersten Zerfallen des Radiums stammen, während die übrigen drei Viertel durch das Zerfallen der Emanation entstehen, so muß, wenn die Emanation usw. entfernt wird, die Wärmewirkung

---

*) Phil. Mag. 1904, VI, 7, p. 202.

des Radiums auf den vierten Teil des ursprünglichen Wertes sinken, während die Emanation usw. drei Viertel des ursprünglichen Wertes abgibt. Daher entwickelt die Gleichgewichtsmenge der Emanation in einem Gramm Radium in der Stunde 75 Grammkalorien. Die Gesamtmenge der während der ganzen Lebensdauer ausgestrahlten Wärme erhält man, indem man die auf eine Stunde entfallende Emission mit der mittleren Lebensdauer der Emanation, in Stunden ausgedrückt, multipliziert. Sie ist also ungefähr gleich 10000 Kalorien. Das Volum ist, wie wir gesehen haben, ein Kubikmillimeter. Die von einem Kubikzentimeter während der vollständigen Umwandlung ausgestrahlte Energie ist also gleich 10^7 Kalorien. Dies Resultat ist rein experimenteller Natur und unabhängig von jeder Hypothese. Die Energie, welche bei der Explosion von einem Kubikzentimeter Knallgas frei wird, ist ungefähr gleich zwei Kalorien. Die beim Zerfallen der Radiumemanation freiwerdende Energie ist also fünfmillionenmal größer als die Energie der Explosion eines gleichen Volums Knallgas. Dies bildet vielleicht den überzeugendsten Beweis dafür, daß die Energie der Radioaktivität nicht von außen stammen, sondern ihren Ursprung nur in der inneren Energie des Atoms haben kann.

Hiermit ist die Reihe von Experimentaluntersuchungen, die seit der Aufstellung der Theorie des Zerfallens der Atome zur Begründung dieser Theorie

4

ausgeführt worden sind, abgeschlossen. Einige Folgerungen, die noch der experimentellen Bestätigung bedürfen, verdienen kurz erwähnt zu werden. Es wird zweckmäßig sein, die beiden Hauptwege, auf denen wir vom Zerfallen der Atome Kenntnis erhalten haben, noch einmal zu überblicken. Die Übergangsformen machen sich durch die große Geschwindigkeit, mit der sie sich verwandeln, oder, besser gesagt, durch die Energiewirkungen bemerkbar, von denen die Umwandlung begleitet ist, und die im Vergleich zu der beteiligten Menge ungeheuer groß ist. Die Endprodukte können studiert werden, weil sie sich kontinuierlich ansammeln und nach hinreichend langer Zeit und bei Anwendung von hinreichendem Material zu Mengen anwachsen, die direkt nachgewiesen werden können. Es fragt sich nun, ob zwischen den beiden Gruppen eine scharfe Grenze existiert. In der Tabelle auf S. 29 sind die bekannten Metabole nach ihrer mittleren Lebensdauer angeordnet. Es wird angenommen, daß bei Uran und Thor die mittlere Lebensdauer millionenmal größer ist als bei Radium, weil die Radioaktivität ungefähr millionenmal kleiner ist. Man sieht, daß eine ziemlich vollständige Reihe von Formen bekannt ist, da die verschiedenen Werte für die mittlere Lebensdauer von einigen Sekunden bis zu tausend Millionen Jahren variieren. Je größer die mittlere Lebensdauer eines Metabolon ist, desto mehr hat es die Natur eines stabilen Elementes und

desto weniger die Natur einer Übergangsform. So ist in der Pechblende ein Urelement A enthalten, welches außerordentlich langsam in die Übergangsformen B, C, D, E usw. zerfällt. Die entsprechenden Umwandlungsgeschwindigkeiten seien λ_A, λ_B, λ_C usw. Wenn das Gleichgewicht der Radioaktivität erreicht ist, d. h. wenn von jeder Form die Menge, welche verwandelt wird, ebenso groß ist wie die Menge, welche erzeugt wird, so hängt die wirklich vorhandene Menge einer jeden Form zerfallender Elemente nicht von der eigenen Umwandlungsgeschwindigkeit ab, sondern sie ist für alle Formen ziemlich dieselbe. Der Betrag jeder Umwandlung hängt nur von λ_A ab und ist von λ_B, λ_C usw. unabhängig. Dies ist ein Satz von großer Wichtigkeit. Wenn die Umwandlungsgeschwindigkeit eines Metabolons abnimmt und die Entdeckung desselben in jeder beliebigen Menge immer schwieriger wird, so wird die Gleichgewichtsmenge, welche sich ansammelt, immer größer. Die Radioaktivität der einzelnen Formen wird ausgedrückt durch $\lambda_A N_A$, $\lambda_B N_B$, $\lambda_C N_C$ usw., wenn N_A, N_B usw. die wirkliche Anzahl der Atome jeder dieser Formen bezeichnet, und wenn angenommen wird, daß ein Atom von A ein Atom von B erzeugt usw. Da für das Gleichgewicht der Radioaktivität $\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C \ldots$, so folgt, daß die Menge einer Übergangsform, die sich ansammelt, seiner Umwandlungsgeschwindigkeit umgekehrt und seiner mittleren Lebensdauer direkt

proportional ist. Wir wollen nun annehmen, daß *B*, *C*, *D* Formen sind, die sich schnell ändern, daß dagegen *E* eine Form ist, die sich sehr langsam ändert. Wenn dann das Mineral durch chemische Analyse in seine verschiedenen Bestandteile zerlegt wird, so erscheint *E* nicht als eine Übergangsform wie *B*, *C*, *D*, sondern als ein neues Radioelement, dessen Aktivität so gut wie permanent ist. Ob *E* durch seine gewöhnlichen chemischen Reaktionen entdeckt wird, hängt einfach von seiner Menge ab, und diese ist, wie wir gesehen haben, seiner mittleren Lebensdauer proportional. Wenn eine hinreichende Anzahl von Tonnen des Minerals verarbeitet werden, so erscheint es als ein neues, stark radioaktives Element.

In diesem Lichte betrachtet sind die neuen Elemente Radium, Aktinium und Polonium wahrscheinlich nur Übergangsformen von geringer Umwandlungsgeschwindigkeit, die bei dem Zerfallen des Urelementes Uran entstehen. Die in der Pechblende enthaltene Menge des Radiums ist ungefähr der millionste Teil der Menge des Urans, und seine mittlere Lebensdauer ist der Aktivität der Gewichtseinheit entsprechend ungefähr millionenmal kleiner. Wenn wir annehmen, was wahrscheinlich ist, daß der von Marckwald als Radiotellur bezeichnete Bestandteil der Pechblende mit Frau Curies Polonium identisch ist, so sind von diesem Element in zwei Tonnen Material weniger als vier Milligramm

enthalten. Die mittlere Lebensdauer des Poloniums ist, wie aus den Beobachtungen der Frau Curie hervorgeht, etwas größer als ein Jahr oder ungefähr gleich dem tausendsten Teil der mittleren Lebensdauer des Radiums. Diese Betrachtungen sind in ihrer Anwendung nicht streng quantitativ, sondern sie beziehen sich nur auf den Grad der Mengen, die erwartet werden können.

Was zunächst das Polonium betrifft, so sinkt seine Aktivität in ungefähr einem Jahr auf die Hälfte des Anfangswertes. Dies beweist, daß das gegenwärtige Vorkommen von Polonium in der Pechblende auf die kontinuierliche Erzeugung desselben in dem Mineral zurückzuführen ist. Es fragt sich nur, welches die Natur des Urelementes ist, und welches das Stadium des Zerfallens ist, durch welches das Polonium erzeugt wird. Frau Curie erwähnt in ihrer Abhandlung eine Erscheinung, die vielleicht mit dieser Frage zusammenhängt. Wenn die „induzierte“ Radioaktivität des Radiums abfällt, so nimmt sie in geometrischer Progression mit der Zeit ab, und zwar sinkt sie alle 30 Minuten auf den halben Wert. Wenn sie aber ungefähr auf den zwanzigtausendsten Teil des Anfangswertes gesunken ist, so nimmt sie nicht weiter ab, sondern bleibt lange Zeit so gut wie konstant. Frau Curie nennt diese Erscheinung „die induzierte Aktivität des Radiums mit geringer Dissipationsgeschwindigkeit“. Es bietet sich nun die Frage, ob das Polonium die

Ursache der Erscheinung ist. Dann würde die Reihe für das Zerfallen des Radiums die folgende sein.

Radium.
↓
Radiumemanation.
↓
Materie, die induzierte
Aktivität verursacht I.
↓
Dasselbe II.
↓
Dasselbe III.
↓
Polonium.
↓
?

Zugunsten dieser Auffassung läßt sich die folgende Tatsache geltend machen. Wenn λ_1 die Radioaktivitätskonstante des Poloniums und λ_2 die Radioaktivitätskonstante der Form von Materie ist, durch die es erzeugt wird, so muß, wie bereits auseinandergesetzt wurde, nach beendeter Umwandlung das Verhältnis der Aktivität des Poloniums zur anfänglichen Aktivität der Materie, durch die es erzeugt wird, eine Zahl von der Größenordnung λ_1/λ_2 sein. Dieses Verhältnis ist nun nach Frau Curie $^1/_{20000}$. Folglich ist $\lambda_2 = 6 \times 10^{-4}$. Für das letzte Stadium der Materie, welche die induzierte Aktivität verursacht, ist $\lambda = 3{,}8 \times 10^{-4}$.

Diese Verhältnisse verdienten nach meiner Ansicht näher aufgeklärt zu werden, und ich habe

daher die Erscheinung der induzierten Aktivität mit langsamer Dissipation einer experimentellen Prüfung unterworfen. Das Polonium ist, wie man sich erinnern wird, dadurch charakterisiert, daß es nur α-Strahlen gibt. Es ergab sich, daß die fragliche Aktivität sowohl α-Strahlen als auch β-Strahlen enthält, aber die Menge der β-Strahlen ist äußerst gering, nämlich nur ein Zehntel der Menge, die von einer dünnen Schicht Uranoxyd ausgeht. Die Materie, welche die Aktivität erzeugt, ist jedoch nicht homogen. Ein Teil verflüchtigt sich sehr leicht, wenn das Glas, auf welchem sie abgeschieden ist, in einem Probierglas über der Flamme eines Bunsenschen Brenners erhitzt wird, und dieser Teil setzt sich an den vollkommen kalten Wänden des Probierglases ab. Polonium ist, wie man sich erinnern wird, leicht zu verflüchtigen. Weitere Aufklärung erhält man vielleicht, wenn die Proben nach einiger Zeit nochmals untersucht werden, nachdem sich etwa vorhandene Zwischenprodukte umgewandelt haben. Wenn sich nämlich die Anwesenheit von Polonium nicht in dieser Weise erklären läßt, so muß in der Pechblende noch ein anderes mehr oder weniger permanentes Radioelement vorhanden sein, denn die Materie, welche die induzierte Aktivität mit langsamer Dissipation verursacht, muß sich in der Pechblende anhäufen, bis ihre Aktivität mit derjenigen der anderen Produkte des Zerfallens der Atome vergleichbar ist.

Die Ansicht, daß das Polonium ein Zersetzungsprodukt des Radiums ist, wird anscheinend durch einige von Giesel*) ausgeführte Versuche bestätigt. Er schied nach dem von Marckwald befolgten Verfahren Polonium aus der Pechblende aus, indem er in die Lösungen kräftiger Radiumpräparate Stäbchen von Wismut, Palladium und Platin eintauchte. Nachdem die Metalle von jeder Spur Radium befreit und einige Tage sich selbst überlassen worden waren, zeigten sie eine anscheinend permanente Aktivität, die nur aus α-Strahlen bestand. Giesel betrachtet dies als eine Bestätigung seiner früher ausgesprochenen Ansicht, daß „Polonium durch Radium induziertes Wismut sein könne". Polonium könnte ebensogut als induziertes Platin oder induziertes Palladium bezeichnet werden. Mit Rücksicht auf die Theorie des Zerfallens der Atome kann das Resultat Giesels so ausgesprochen werden, daß Polonium aus Radium entsteht und aus der Lösung auf Wismut, Platin und Palladium abgeschieden wird. Giesel fand ferner, daß ein radioaktiver Niederschlag auf einem Draht entsteht, der in das Gas über der Lösung gehalten wird. Dies steht in Einklang mit der Annahme, daß Polonium aus der Materie entsteht, die die induzierte Aktivität verursacht, und die selbst aus der Emanation entsteht, die aus der Radiumlösung in die Luft diffundiert. Allein da die

*) Chem. Ber. 1903. S. 2368.

zurückbleibende Aktivität, wenigstens bei meinen Versuchen, β-Strahlen, wenn auch von geringer Intensität, gab, so erscheint das Resultat etwas zweifelhaft, namentlich auch, ob die in der Lösung auf den Metallen zurückbleibende Aktivität vollkommen frei von β-Strahlung war. Diese Erklärung kann daher einstweilen noch nicht als vollständig bewiesen angesehen werden.

Wenn sich unsere Beobachtungen über einige Jahrtausende anstatt über einige Jahre erstreckten, so würden die für das Polonium geltend gemachten Argumente in gleichem Grade für das Radium gelten. Auch dieses Element muß nach seiner Umwandlungsgeschwindigkeit eine Übergangsform sein, und daß es jetzt noch existiert, kann nur durch die Annahme erklärt werden, daß es in den Mineralien in demselben Maße, wie es zerfällt, fortwährend neu gebildet wird. Ich habe im Laufe des letzten Jahres zu ermitteln versucht, ob eine radiumfreie Menge Uran im Laufe der Zeit eine nachweisbare Menge Radium erzeugt. Die Versuche können jedoch erst nach Verlauf einer längeren Zeit zu entscheidenden Resultaten führen. Es läßt sich ja viel gegen diese Annahme einwenden, aber es wird sich mit der Zeit herausstellen, ob die Einwendungen begründet sind oder nicht. Bei diesen Betrachtungen haben wir allerdings mit einem sehr wichtigen, unbekannten Faktor zu rechnen, nämlich mit dem Aktinium. Solange dieses Element nicht einem exakten

Studium zugänglich ist, haben wir bei dem Versuch, den Verlauf der einzelnen Vorgänge, die die Radioaktivität der Pechblende verursachen, vollständig aufzuklären, auf so viele Möglichkeiten Rücksicht zu nehmen, daß sich über das Endergebnis dieser Untersuchungen nichts mit Bestimmtheit voraussagen läßt. Gewisse Erwägungen machen es wahrscheinlich, daß das Aktinium eine Übergangsform zwischen Uran und Radium ist.

Diese Betrachtungen sollten zeigen, daß es wenigstens möglich, wenn auch noch nicht vollständig bewiesen ist, daß alle radioaktiven Substanzen Übergangsformen sind, die beim Zerfallen der schwersten Elemente, die man kennt, des Urans und des Thors, entstehen. Diese bilden die Urtypen für die übrigen fünfzehn Typen, welche man bis jetzt kennt. Welche Folgerungen sich hieraus ergeben, ist leicht einzusehen. Die mittlere Lebensdauer dieser beiden Elemente, ist, wie wir gesehen haben, mindestens 10^9 Jahre. Dieser Zeitraum ist so groß, daß er uns bis an die mutmaßliche Grenze der Existenz der Erde als eines selbständigen Planeten zurückführt. Der Annahme, daß während der vergangenen Zeiträume, die sich aus anderen Betrachtungen für das Alter der Erde ergeben, das Zerfallen dieser Elemente kontinuierlich mit derselben Geschwindigkeit wie heute stattgefunden hat, steht nichts im Wege. Es ist daher nicht unbedingt notwendig anzunehmen, daß gleichzeitig ein Prozeß der Reproduktion statt-

gefunden hat. Die geologische Schätzung des Alters der Erde hat zu dem Werte von hundertmillionen Jahren geführt, und dies ist der höchste Wert, der sich bis jetzt als notwendig erwiesen hat. Er ist nur gleich dem zehnten Teil der mittleren Lebensdauer der Uran- und Thoratome. Die kosmischen Trennungsprozesse, die während der Urzeit stattgefunden haben, und die zur gegenwärtigen nichthomogenen Zusammensetzung der Erde und zur gegenwärtigen Gruppierung der Elemente in den Mineralien geführt haben, können sich also ganz gut während der Lebensdauer des Urans und des Thors vollzogen haben, welches gegenwärtig in der Erdrinde vorkommt. Die Annahme, daß die Atome zerfallen, ohne daß sie zugleich wieder aufgebaut werden, steht nicht mit den Vorstellungen über die Dauer des Universums in Widerspruch, die man aus anderen Entwickelungsprozessen abgeleitet hat. Es soll nicht in Abrede gestellt werden, daß neben dem Prozeß des Zerfallens ein komplementärer Prozeß der Rekonstruktion bestehen kann. Aber die Notwendigkeit, einen solchen Prozeß anzunehmen, liegt, soweit wir dies gegenwärtig zu beurteilen vermögen, nicht vor.

Wenn wir nämlich die Untersuchung noch weiter treiben und fragen wollten, wie und wann die schwersten Formen der Materie entstanden sind, so würden wir der großen Frage gegenüberstehen, auf welches noch keine Wissenschaft Licht geworfen

hat: Wie und wann ist das Universum entstanden? Alle Entwickelungsprozesse, die man kennt, verlaufen in derselben Richtung und erfordern daher einen Anfang und ein Ende. Es ist leicht einzusehen, welches das Ende sein muß, wenn der Prozeß in der gegenwärtigen Richtung weiter fortschreitet. Nach den gewöhnlichen orthodoxen Begriffen kommt man notwendigerweise zu dem Schlusse, daß das Universum einem Zustand der Erschöpfung zustrebt, in dem alle Verwandlung aufhören muß. Was den Ursprung betrifft, so genügt es, diesen nur auf eine der drei Grunddimensionen Masse, Raum und Zeit zu beziehen, da jede von ihnen ohne die beiden anderen bedeutungslos ist. Die einfachste Vorstellung, welche man sich über die Natur des Schöpfungsaktes machen kann, besteht darin, daß man ihn auf die Zeit bezieht. Das Universum kann mit einer aufgezogenen Uhr verglichen werden. Der Schöpfungsakt besteht dann in dem Anlassen der Uhr. Wie lange die Uhr existiert hat, bevor sie angelassen wurde, und wie lange sie noch existieren wird, nachdem sie abgelaufen ist, sind Fragen, die keinen Sinn haben, denn der Begriff der Zeit ohne Veränderung ist unmöglich, und Masse und Raum existieren ebenfalls nur in Beziehung auf die Zeit.

Die andere Art, wie sich die Entwickelung auffassen läßt, besteht in der Annahme, daß sie sich kontinuierlich in Zykeln vollzieht, mit anderen

Worten, daß jeder Prozeß, der in der einen Richtung verläuft, von einem komplementären Prozeß begleitet wird, der in der entgegengesetzten Richtung verläuft. Diese Auffassung würde jedenfalls eine bessere Lösung des Problems bilden. Die Hauptschwierigkeit, welche sich derselben bis jetzt entgegengestellt hat, ist, wie es scheint, das zweite Gesetz der Thermodynamik gewesen, daß, wenn eine Umwandlung von Energie spontan in der einen Richtung stattfindet, die Umwandlung nicht von selbst in der entgegengesetzten Richtung stattfinden kann. Aber auch hier muß, wie schon bei einer anderen Gelegenheit hervorgehoben wurde, zwischen persönlicher Unfähigkeit und natürlicher Unmöglichkeit unterschieden werden. Da das chemische Atom niemals in bekannten Prozessen eine Teilung erfahren hat, war es in Gefahr, in bezug auf alle bekannten und unbekannten Kräfte der Natur als unteilbar angesehen zu werden. Ist nicht die ganze Frage der Möglichkeit eines ewigen Zyklus von Energieumwandlungen in dem Prozesse der kosmischen Entwickelung in einer ähnlichen Lage wie die Atomtheorie vor der Entdeckung der Radioaktivität? Clerk Maxwell hat durch seinen „sortierenden Dämon“ gezeigt, daß man sich ganz leicht einen Prozeß denken kann, bei dem Wärme von niedrigerer zu höherer Temperatur übergeht, und die Geschichte lehrt, daß die Hilfsquellen der Natur in den meisten Fällen weit ergiebiger sind, als sich

die kühnste Phantasie vorzustellen vermag. Von zukünftigen Entdeckungen in diesem Zusammenhang wird es abhängen, ob die Wissenschaft gezwungen sein wird, für das Universum eine Theorie anzunehmen, in welcher eine schöpferische Kraft den Ausgangspunkt und universeller Tod das Ende bildet.

Es ist allerdings nicht leicht, diese Annahme zu umgehen. Da wir die von einem zerfallenden Atom ausgesandte Energie kennen, kennen wir auch die Energie, welche erforderlich ist, um das Atom aus seinen Bestandteilen wieder aufzubauen. Diese ist sehr groß, und selbst wenn man annimmt, daß Wärme von gleichförmiger Temperatur zu Gebote steht, kann man sich schwer eine Vorstellung davon machen, wie sie von der Umgebung geliefert werden kann, wenn nicht ein beträchtlicher Umkreis in Anspruch genommen wird. Auf den ersten Blick hat es den Anschein, als ob die Atomtheorie, die durch das Zerfallen der Atome so auffallend bestätigt wird, für die Annahme eines Aufbaues der Atome ein Hindernis bilde. Dieser Aufbau kann nur als ein allmähliches und kontinuierliches Anwachsen der Masse des Atoms gedacht werden, bei dem die erforderliche Energie nach und nach in sehr kleinen Mengen von der Wärmeenergie der Umgebung geliefert wird. Die Atomtheorie scheint aber der schrittweisen Degradation entsprechend auch ein schrittweises Anwachsen zu erfordern. Diese Schwierigkeit ist jedoch nur eine scheinbare. Wir

haben nur das schrittweise Anwachsen in der Komplexität der Atome zu erklären, die uns bekannt sind. Es braucht durchaus nicht angenommen zu werden, daß die Zwischenformen (die ein kontinuierliches Anwachsen der Masse vom leichtesten bis zum schwersten Atom repräsentieren) ganz unfähig sind zu existieren. Man braucht nur anzunehmen, daß das Anwachsen der Masse zwischen den Punkten der Stabilität, wie sie durch die Atome des periodischen Systems repräsentiert werden, mit größerer Geschwindigkeit erfolgt. Dies würde zur Folge haben, daß sich die Zwischenformen bei dem Aufbau ebenso wie die Zwischenformen beim Zerfallen niemals in solcher Menge ansammeln, daß sie durch direkte Methoden entdeckt werden können. Dies sind einstweilen nur Vermutungen, aber in der Frage nach der Konstitution der Materie befinden wir uns gegenwärtig in einer Ära der Spekulation, und je mehr das Problem von unabhängigen Gesichtspunkten betrachtet wird, desto mehr Aussicht ist vorhanden, daß sich die Spekulation als fruchtbar erweist. Die alte Ordnung verschwindet und macht einer neuen Platz. Die Elektronen werden als Bestandteile der Atome betrachtet, und ein weiterer Schritt, der wenigstens möglich ist, führt von dieser Anschauung zu der von Sir William Crookes vertretenen Theorie, daß alle Atome aus demselben Urstoff, dem Protyl, bestehen. Liegt es im Bereiche der Möglichkeit, daß die Masse des

Atoms in der angegebenen Weise durch die Vereinigung von Elektronen entstanden ist?

Mit dem Fortschreiten der Wissenschaft sind die Grenzen des Universums mit Rücksicht auf die Dauer seiner Vergangenheit und Zukunft immer weiter in die Ferne gerückt worden. Durch die Entdeckung der Radioaktivität und der ungeheueren Energievorräte, die mit der Struktur der Atome der komplexeren Formen der Materie verbunden sind, haben diese Grenzen nach beiden Richtungen hin eine ungeheuere Erweiterung gefunden. Diese Erweiterung kann aber, soweit wir dies jetzt beurteilen können, nur als eine Art Aufschub betrachtet werden. Das Ende ist nur in die Ferne gerückt, nicht aufgehoben worden. Die Geschichte des Universums beginnt trotz dieser Fortschritte noch mit einem geheimnisvollen Ursprung und schließt mit der Verkündigung eines unvermeidlichen Untergangs. Aber niemand wird glauben, daß das letzte Wort gesprochen ist. Es ist wenigstens nicht ganz unwahrscheinlich, daß durch weitere Entdeckungen die beiden unlösbaren Rätsel der Philosophie umgangen werden, und daß das Universum als ein konservatives System erkannt wird, welches weder in der Zukunft noch in der Vergangenheit eine Grenze hat, sondern in einer kontinuierlichen zyklischen Entwickelung fortschreitet.

Spamersche Buchdruckerei in Leipzig

